UDC 621.039.6 : 621.316.99 : 533.9.03

論文

57-B47

臨界プラズマ試験装置(JT-60)接地系の検討

非会員 荒川 喜代次 (日本原子力研)

正員 嶋田 隆一 (日本原子力研)

非会員 岸本 浩 (日本原子力研)

正員 藪野 光平 (日立製作所)

正員 石垣 幸雄 (日立製作所)

非会員 伊東 新一 (日立製作所)

1. ま え が き

臨界プラズマ試験装置(以下、JT-60と呼ぶ)は現在、日本原子力研究所で建設を進めている大形核融合試験装置である。核融合試験装置は、瞬時に高圧大電流を必要とするものである。このため、人身の保護と装置機器の保全をはかるとともに、複雑かつ精密な制御・計測システムの安定した運転を実現するために大規模な接地系設備が必要になる。

一般に電力設備の接地設計は、電気設備技術基準に基づく第1種、第2種、第3種および特別第3種接地工事のいずれかによって行なわれるのが通例になっている。アメリカなどでは、IEEEによる交流変電所の接地系に関する指針書も出されている⁽¹⁾。

JT-60実験施設の場合、実験棟、電源棟、制御棟などの建家が広い敷地内に配置され、それぞれ機能の異なった機器が建家を隔てて連結される。このため、建家間に高い電位差が生じないようにすることが重要なポイントになる。JT-60接地系では各建家ごとに「網状接地電極」と呼ぶメッシュ布設を行ない、更に各建家の網状接地電極を「接地幹線」と称する低インピーダンスの金属ダクトで接続し、ダクト内に各磁場コイル給電線、制御線、計測線などを敷設する構成法を採用している。接地幹線がない場合落雷時に、建家間に、

高い電位差が発生する。建家間は、異なった実験設備が、コイル給電線、ケーブル、制御線などで接続されているため、機器の絶縁が確保できなくなるという問題を生ずる。そこで、接地幹線の効果を解析により定量的に把握することが、大きな課題となった。避雷系はJT-60接地系とは独立に設けられている。

ところが、建家間電位差を発生させる原因としては実験施設外での落雷事故、実験施設内での地絡事故などによる網状接地電極への事故電流の流入が考えられる。そこで、接地系において、落雷、地絡などの事故が発生した場合、接地系電位の上昇、あるいは建家間の電位差などを定量的に把握することが重要になる。従来、急しゅんな雷電流が接地系に流入したときの、接地系の電位分布の計算、実測値の例は数少ない。最近の例としては、網状接地電極を等価回路に置き換え、差分法による近似計算を試みた例⁽²⁾⁽³⁾がある。また、変電所の設備を使い、実際に雷電流を接地系に流入させ、接地系の電流分布を測定した例⁽⁴⁾や、更に、こうした実験によって、低圧回路への誘導を実測した例⁽⁵⁾もある。そこで、筆者らは、JT-60実験施設の接地系を対象に新しい計算コードを使い、落雷、地絡事故による大電流の接地系への流入現象を解析し、接地系設計を色々な角度から検討した。計算コードは、1つはEMTP(Electro Magnetic Transients Program, BPA社プログラム)、もう一つは日立的サイリスタ回路解析のための汎用プログラムであるSCAPを使用した。特に前者は進行波法を用いて解かれているためサージ解析に適している。従来のECAPは接点解析法であるため、サージ解析に適しない。

計算に際しては接地系のモデルを設定し、避雷系に落雷があった場合と実験棟内で磁場コイルの地絡事故があった場合における接地幹線の効果について検討した。

Study of Grounding System of Large Tokamak Device JT-60.
By Ryuichi Shimada, Member, Kiyotsugu Arakawa, Non-Member, Hiroshi Kishimoto, Non-Member (Division of Large Tokamak Development, Japan Atomic Energy Research Institute) Kohei Yabuno, Member, Yukio Ishigaki, Member (Hitachi Works, Hitachi Ltd.), Shinichi Itoh, Non-Member (Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd.)

荒川喜代次: 非会員, 日本原子力研究所
嶋田隆一: 正員, 日本原子力研究所
岸本 浩: 非会員, 日本原子力研究所
藪野光平: 正員, 日立製作所日立研究所
石垣幸雄: 正員, 日立製作所日立工場
伊東新一: 非会員, 日立製作所日立工場

図 1 JT-60 接地系の鳥瞰図

Fig. 1. View of JT-60 grounding system.

2. JT-60 接地系の基本構成

JT-60 接地系は次の 5 つの基本構想から成立っており、その鳥瞰図を図 1 に示す。

(1) 基本接地方式は一般に発・変電所などで採用されている「メッシュ布設方式」で、ここでは「網状接地電極」と称し、網状接地電極を構成する線を「メッシュ線」と呼ぶことにする。但し、各建家地下床面部の鉄筋自体が網状接地電極構造になっているため、これを利用する。網状接地電極の形態は、接地系に大電流が流入した場合でも、積極的に大地に流すことによって、網状接地電極の電位上昇を抑制できる方式（これを「導電型」と称する）を採用する。

(2) JT-60 実験施設の内、特に接地系に影響を及ぼす主な施設としては、トカマク本体を設置する実験棟、電源設備を設置する電源棟、計算機をはじめとする制御設備を設置する制御棟、それに受変電設備などがある。これらの建家の配置、建家内の各々の機器の相互接続方法などを考慮して網状接地電極を建家ごとに分離（これを「分離メッシュ」と称する）して設け建家間の電位差を低くするために、各網状接地電極間は「接地幹線」と称する低インピーダンスの金属ダクトで電氣的に接続する構成にする。また、接地幹線内には、磁場コイル給電線、制御線、計測線などを敷設

する。

(3) JT-60 接地系全体の基準電位を保証するために、網状接地電極の他に、更に「総合基準接地電極」と称する基準電極を設ける。

(4) 各建家には、それぞれ網状接地電極とは独立した「避雷系」を設ける。

(5) 各建家においては、接地幹線に直結する「建家内接地線」を設け、建家内接地線の上に「基準接地端子」を設け、そこから、各機器まで「接地支線」で接続する構成にする。

3. 解析条件

〈3・1〉落雷時の解析条件 JT-60 接地系の網状接地電極は建家地下床面部の鉄筋を使用するが、これをそのままモデル化するとメッシュ線が多くなり複雑になるため、図 2 に示すようなメッシュ線間幅 20 m の解析モデルを設定した。分割数を大きくしても特に接地抵抗が低くなることはない⁽⁶⁾。

網状接地電極の全体の接地抵抗は、Schwartz の式⁽⁷⁾

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \left\{ \ln \frac{2L}{\sqrt{2}ad} + K_1 \frac{L}{\sqrt{A}} - K_2 \right\} \dots (1)$$

を使って算出した。ここで、 ρ は大地固有抵抗で、JT-60 実験施設が配置される茨城県那珂郡那珂町の設

図 2 JT-60 接地系の解析モデル

Fig. 2. Simulation model of JT-60 grounding system.

置場所の土壌質から $150\Omega \cdot m$ と設定した。A は網状接地電極全体の面積 (m^2)、 L はメッシュ線の全長 (m)、 a はメッシュ線半径 ($5 \times 10^{-3}m$)、 d は網状接地電極の大地表面からの深さ ($1.5m$)、 K_1, K_2 は単位網状接地電極のメッシュ線の縦と横の長さの比 ($1/1$ とした) によって決まる係数で、 $K_1=1.37, K_2=5.70$ となる。

網状接地電極のメッシュ線の大地に対する接地抵抗は図 2 に示すようにメッシュ線が交さるメッシュ節点から大地までの抵抗回路でモデル化した。更にメッシュ線の交さ数によって次のような重みをつけた。

$$r_{d1} : r_{d2} : r_{d3} = 3 : 2 : 1 \dots \dots \dots (2)$$

従って、メッシュ節点数は r_{d1} で n_1 点、 r_{d2} で n_2 点、 r_{d3} で n_3 点あったとすると、網状接地電極の全体の接地抵抗 R は

$$\frac{1}{R} = \frac{n_1}{r_{d1}} + \frac{n_2}{r_{d2}} + \frac{n_3}{r_{d3}} \dots \dots \dots (3)$$

となる。 r_{d1}, r_{d2}, r_{d3} は (2) (3) 式より算出できる。

次に、メッシュ線のインダクタンス l は、メッシュ線の全体の縦または横の長さを L とし、それを N 分割すると (4) 式となる。

$$l = \frac{\mu_0 L}{4\pi N} \left(\ln \frac{2L}{a} - 1 \right) (H) \dots \dots \dots (4)$$

以上の算出式より、JT-60 接地系の網状接地電極の接地抵抗およびインダクタンスは表 1 に示すようになる。シミュレーションでは特に断わらない限り表 1 の定数を使用する。

JT-60 の避雷系は、JT-60 接地系とは独立して設置される。独立という意味は、両方の系がお互いに電気的に接続されないということである。しかし、実際には地表面あるいは地中でお互いに隔離されていても地

中の水分を含んだ土壌を通して結合されといえるべきである。従って、避雷針に落雷があれば、地中の避雷電極から大地を通して、JT-60 接地系の網状接地電極への影響を考慮しなければならない。

図 2 に示す避雷針から避雷電極までの引下線の形状を直径 8.5ϕ 、長さ $50m$ の導線とすると、インダクタンスは $L_s=93.2\mu H$ 、抵抗は $R_s=17.5m\Omega$ となる。

次に、避雷電極の大地との結合状態は、2 種類の抵抗成分で考えた。1 つは、雷電流が大地へ帰還するための接地抵抗 (R_0)、もう一つは、メッシュ線への電流の漏えいを考慮した漏えい抵抗 (R_0) である。

R_0 が小さく R_0 が大きくなれば雷電流はほとんど大地へ帰還するため、網状接地電極への影響は少なくなり、 R_0 が大きく、 R_0 が小さくなると雷電流は網状接地電極に流入するため影響が大きくなる。漏えい抵抗 R_0 は図 2 に示すように避雷電極とメッシュ線との間の 4 並列抵抗でモデル化した。メッシュ線の長さを l_1 、避雷電極の長さを l_2 とし、避雷電極の中心からメッシュ線の間の任意の距離を x とすると、

$$R_0 = \frac{\rho l_1}{2 l_2} \int_{r_1}^{(l_1/x)-r_2} \frac{dx}{x(l_1-2x)} (\Omega) \dots \dots (5)$$

で表わすことができる。 r_1, r_2 は、それぞれメッシュ線、避雷電極の半径 (m) を表わす。本シミュレーションでは $r_1=5 \times 10^{-3}m$ 、 $r_2=1.0 \times 10^{-2}m$ とし、 $l_1=20m$ 、 $l_2=5m$ と設定して、(5) 式から R_0 を算出すると、 $R_0=217\Omega$ となる。そこで、本シミュレーションにおける漏えい抵抗の基準値を $R_0=200\Omega$ とした。

総合基準接地電極 GLD の接地抵抗 R_{GLD} は

表 1 網状接地電極の諸定数

Table 1. Parameters of ground mats.

電気諸量	電源線	実験線	制御線
接地抵抗	全接地抵抗 0.751	全接地抵抗 0.884	全接地抵抗 1.22
	$r_{d1}=59.1\Omega(4)$	$r_{e1}=59.5\Omega(6)$	$r_{c1}=44.0\Omega(4)$
	$r_{d2}=44.3\Omega(20)$	$r_{e2}=44.6\Omega(16)$	$r_{c2}=33.0\Omega(12)$
	$r_{d3}=29.5\Omega(24)$	$r_{e3}=29.8\Omega(20)$	$r_{c3}=22.0\Omega(8)$
インダクタンス	1方向全インダクタンス 278 μH	1方向全インダクタンス 235 μH	1方向全インダクタンス 192 μH
	$L_{d1}=39.7\mu H$	$L_{e1}=39.1\mu H$	$L_{c1}=38.4\mu H$
	2方向全インダクタンス 192 μH	2方向全インダクタンス 235 μH	2方向全インダクタンス 109 μH
	$L_{d2}=38.4\mu H$	$L_{e2}=39.1\mu H$	$L_{c2}=36.3\mu H$

(註) () は接地抵抗の分割数を示す

Dwight の式⁽⁶⁾を使用して算出した。

$$R_{GLD} = \frac{K\rho}{2\pi nd} \left(\ln \frac{8d}{r} - 1 \right) (\Omega) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 ρ は大地の固有抵抗 ($150\Omega\cdot m$)、 K は打込棒の打込み間隔によって決まる定数を表わす。本シミュレーションでは $d=9m$ 、 $r=1.25\times 10^{-2}m$ 、 $n=36$ 、 $K=1.05$ として、 $R_{GLD}=0.95\Omega$ となる。

次に接地幹線と制御線のモデルについて述べる。ある建家内の機器と、別の建家内の機器とを接続する場合、磁場コイル給電線、制御線、計測線などは接地幹線内を通る。接地幹線は導体線を組合せて作った矩形断面形状の金属ダクトである。

接地幹線の 1m 当りのインダクタンスの設計値を $0.8\mu H$ とし、制御棟内の接地幹線の端子 S_0 から総合基準接地電極 GLD 間の全体のインダクタンスを $140\mu H$ とした。また、接地幹線の N_0 から電源棟内の接地幹線の端子 D_{01} までの全インダクタンスを $100\mu H$ とした。但し、実験棟内の接地幹線の端子 J_0 から総合基準接地電極 GLD を通って電源棟内の別の接地幹線の端子 D_{03} までは、磁場コイルの地絡電流が還流するため、 $J_0\sim GLD$ 、 $GLD\sim N_0$ 、 $N_0\sim D_{03}$ 間は、それぞれ平板導体によって、低インピーダンス ($12\mu H$) を確保した。制御棟の S_0 点から、電源棟の D_{01} までの間の全インダクタンス L_{a1} は $252\mu H$ 、実験棟の J_0 点から電源の D_{03} までの間の全インダクタンス L_{a3} は $36\mu H$ とした。これらをシミュレーションにおける基準値と設定する。

接地幹線と大地間との間の浮遊容量は平板電極の容量算出式より設定し、図2に示すように1分割の梯子形 LC 回路の浮遊容量 C_0 を $90pF$ とした。

制御線の心線のインダクタンスは導線のインダクタンス算出式を使って設定した。

$$L_c = \frac{\mu_0 l_c}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{r} - 1 \right) (H) \quad \dots\dots\dots (7)$$

より、制御線の全長 $l_c=350m$ 、導線の半径 $r=3.19\times 10^{-3}m$ とすると $L_c=790\mu H$ となる。これを14分割して1分割インダクタンス $L_{c1}=56\mu H$ とした。またシースの1分割インダクタンス L_{c2} は $30\mu H$ とした。制御線の心線～シース間の浮遊容量は、1例として $1km$ 当り $120nF$ の数値 (電線便覧) を使い、1分割の梯子形 LC 回路の浮遊容量 C_{00} を $3,000pF$ と設定した。

避雷針に落ちる雷電流波形は、衝撃波電流波形をモデル化し、

$$i=i_0(e^{-\alpha t}-e^{-\beta t}) (A) \quad \dots\dots\dots (8)$$

で表わした。雷電流の波頭長は $2\sim 3\mu s$ のものが多く半波尾長は $10\sim 100\mu s$ となることから $\alpha=1.83\times 10^4$ 、 $\beta=2.95\times 10^6$ とし、 i_0 は $1A$ で規格化した。避雷針に入るときには定電流源として印加するようにした。

落雷時のシミュレーションは、EMTP コードを使って行なった。

〈3.2〉 地絡時の解析条件 実験棟内にあるコイルの一端 (正極性) から架台に対して地絡が発生すると地絡電流は、コイルの正極性端→架台→実験棟内の接地幹線の一端 J_0 →接地幹線→電源→コイル正極性端の回路を通して流れる。このとき接地幹線を通る地絡電流によって、建家内に電位差を発生することが考えられるので地絡事故のモデルを設定した。

JT-60 の磁場コイルは、トロイダル磁場コイルの他に5種類のポロイダル磁場コイルから構成されているが、前述のような地絡事故が発生すると、各コイルの構成が複雑なために連鎖的に事故が進展して競合事故に発展する可能性がある。地絡電流の大きさも競合の度合によって異なり、電源電圧の高いトロイダル磁場コイル電源と垂直磁場コイル電源の競合事故が、地絡電流から見た場合最もか酷になる⁽⁹⁾。従って、ここでは、図3に示すようなトロイダル磁場コイル電源とポロイダル磁場コイル電源の1つである垂直磁場コイル電源との同時地絡事故の解析モデルを設定した。

実際は、コイル給電線は同軸構造であり、またコイルへの接続場所も若干異なるため、このような同時地絡は考えにくい。接地系解析にあたってはこのケースを設定したものである。

シミュレーションは、サイリスタおよびダイオード回路を含んだ電源について行なうため、サイリスタ回路の解析に適した SCAP を使用した。シミュレーション

図3 地絡事故の解析モデル

Fig. 3. Simulation model for ground faults.

表 2 電源および負荷コイルの諸定数

Table 2. Parameters of power supplies and load coils.

回路構成要素	抵抗	インダクタンス	備考
垂直磁場コイル	12.1m Ω	9.9mH	
同上用給電線(1/2)	685.8 $\mu\Omega$	17.1 μ H	往復分は2倍
同上AC側インピーダンス	3.2m Ω	61.4 μ H	サイリスタ変換器
//	2.3m Ω	44.3 μ H	ダイオード変換器
接地抵抗(V)	0.3 Ω	—	
トロイダル磁場コイル	97.0m Ω	1.9H	
同上用給電線(1/2)	914.8 $\mu\Omega$	25.8 μ H	往復分は2倍
同上AC側インピーダンス	2.4m Ω	29.0 μ H	MG電力系
//	1.7m Ω	11.1 μ H	系統電力系
接地抵抗(T)	7.0 Ω	—	
架台	1.0m Ω	100.0 μ H	
接地幹線	31.5 $\mu\Omega$	36.0 μ H	

ョンに使用する回路定数は表2に示す。表においてコイル定数はJT-60本体仕様による。給電線定数は施工仕様により算出した。AC側インピーダンスは電源インピーダンス30%として算出した。電源側接地抵抗は事故電流が流れたときのJT-60本体の電磁力の許容値から決めた値を使用する。接地幹線定数は施工仕様に基づいた値を使用する。

4. シミュレーション結果

〈4.1〉 落雷時における網状接地電極の電位上昇

図2に示す避雷針に雷電流が流入した場合の網状接地電極上の電位上昇の計算を行なった。避雷電極の定数は電極の接地抵抗 R_g を1M Ω (雷電流が殆んど大地へ帰還しない状態を想定した)、〈3.1〉節より避雷

電極とメッシュ線との間の漏えい抵抗 R_o を200 Ω とした。

図4は各建家の網状接地電極のメッシュ節点における電位上昇波形を示す。(a)は制御棟の網状接地電極の四隅のメッシュ節点の電位上昇波形を示す。落雷があつてから約10 μ sで制御棟の電位は最大に達する。避雷電極が制御棟の側にあるため、制御棟内のメッシュ節点上の電位上昇は速い。また、雷電流の伝搬が速いので、メッシュ節点の場所による電位差もそれほど大きくない。(b)は実験棟における接地幹線の末端 J_0 、および網状接地電極の隅のメッシュ節点 J_1, J_{11}, J_{12} における電位上昇波形を示す。雷電流は接地幹線を通して実験棟に流入するのでメッシュ節点の電位上昇は遅くなり、電位が最大に達するのは J_0 点で約80 μ s、 J_0 点から離れた J_1 点で約120 μ sである。その間建家内での電位差は多少あるが、メッシュ節点の電位自体が低いので、それほど問題にならない。(c)は電源棟内の3箇所の接地幹線の末端 D_{01}, D_{02}, D_{03} の電位上昇波形を示す。ここでも、避雷電極に近い所から電位が上昇していくことがわかる。(d)は同じく、電源棟の網状接地電極の4隅のメッシュ節点における電位上昇波形を示す。避雷電極から最も遠い D_9 点では、落雷があつてから約130 μ s後に電位が最大となる。

以上、網状接地電極のメッシュ節点の電位は、制御棟の S_7 点で、最大 2.1×10^{-2} V/A、すなわち雷電流が最大100kAとすると2.1kVまで上昇することを示している。この電位は、〈3.1〉節で述べた避雷電極と網状接地電極との間の結合状態によって変わるので、この点については〈4.2〉節で述べる。

〈4.2〉 落雷時における建

家間電位差 網状接地電極の電位は避雷電極と大地との間の結合状態によって変わることが予想されるので、〈3.1〉節の避雷電極のモデルに従って、避雷電極と大地との間の接地抵抗 R_g 、避雷電極とメッシュ線との間の漏えい抵抗 R_o と建家間電位差との関係を検討した。

図5は図4の場合の制御棟(S_0)~電源棟(D_{01})間の建家間電位差の波形を示す。図6

図 4 落雷時における網状接地電極上の電位上昇波形

Fig. 4. Potential rise at ground mats by lightning faults.

図 5 制御棟 (S_0)～電源棟 (D_{01})間の建家間電位差
Fig. 5. Potential difference between buildings ($S_0 \sim D_{01}$).

図 6 接地抵抗 R_g と建家間電位差の関係
Fig. 6. Potential difference between buildings vs ground resistance.

は漏えい抵抗と建家間電位差との関係を接地抵抗 R_g をパラメータにしてシミュレーションを行なった結果を示す。ここに示す建家間電位差は制御棟内の接地幹線端 S_0 と電源棟内の接地幹線端 D_{01} との間の最大電位差を表わす。接地幹線のインダクタンスは制御棟 (S_0)～電源棟 (D_0)間で $252\mu\text{H}$ とした。

図 6 より明らかなように、漏えい抵抗を大きくすれば建家間電位差は小さくなる。すなわち、雷電流が網状接地電極に流れ込まないことを示している。また、避雷電極の接地抵抗 R_g が大きくなると建家間電位差は大きくなる。これは避雷電極の接地抵抗が大きくなって、雷電流が大地をまわって帰還しないで網状接地電極の方に流れ込んで電位を高くしているためである。

先に述べた避雷電極の形状から算出した R_0 は、 200Ω 程度になるので、雷電流を 100kA とすると、図 6 より R_g が 10Ω 以下になれば建家間電位差は約 $1,000\text{V}$ 以下に低減できると言える。

次に、JT-60 接地系では、網状接地電極を分離した分離メッシュ方式になっているため、網状接地電極間を接続する接地幹線のインピーダンスが、建家間の電位差に大きく影響することが考えられる。そこで、 $S_0 \sim D_{01}$ 間の接地幹線のインダクタンス L_{s1} を変えた

ときに、建家間電位差がどう変るかシミュレーションを行なった。但し、他の接地幹線も同一比率で変えて計算した。シミュレーションでは、避雷電極の漏えい抵抗 R_0 は 50Ω とし、接地抵抗 R_g をパラメータにして検討した。シミュレーション結果を図 7 に示す。

図より、建家間の電位差を低減するには接地幹線のインダクタンスも低減しなければならないことがわかる。

いま、雷電流を 100kA と想定し、建家間の電位差を $1,000\text{V}$ 程度に抑えるには、 $R_0 = 50\Omega$ の場合、 R_g を 1Ω 程度にして接地幹線のインダクタンスを $200\mu\text{H}$ 程度にする必要がある。仮に R_g が 10Ω 程度に大きくなると、図 7 より接地幹線のインダクタンスを相当小さくしないと建家間電位差は低減できないことがわかる。接地幹線の 1m 当りのインダクタンスは、板にして $0.6\mu\text{H}$ までが限界であった。しかし避雷電極の R_g が、第 1 種接地工事法により 1Ω 以下に設定できるため、実際には建家間電位差は低減できる。

〈4.3〉落雷時における制御線への静電誘導 雷電流が網状接地電極に流入すると、接地幹線を通して必ず別の網状接地電極に流入するので、接地幹線の中を通る制御線にサージ電圧が誘起される。そこでシミュレーションによる検討を行なった。

図 8 にシミュレーション結果の一例を示す。図は避雷電極の接地抵抗を $1\text{M}\Omega$ 、漏えい抵抗を 200Ω 、接地幹線の $S_0 \sim D_{01}$ 間のインダクタンスを $L_{s1} = 252\mu\text{H}$ 、 $J_0 \sim D_{03}$ 間のインダクタンスを $L_{s2} = 36\mu\text{H}$ とした場合のシミュレーション結果である。

(a)は避雷電極に近い制御線端子(近端)の心線～シース間のサージ電圧波形を示す。(b)は電源棟側の同じ制御線端子(遠端)の心線～シース間のサージ電

図 7 接地幹線のインダクタンスと建家間電位差の関係

Fig. 7. Potential difference between buildings vs inductance of inter-building ground bus.

図 12 接地幹線定数と建家間電位差および地絡電流の関係

Fig. 12. Dependence on potential difference between buildings and fault currents on electrical constants of inter-building ground bus.

30kA 流れる。また、建家間電位差は図 3 の回路モデルからもわかるように、架台と接地幹線のインピーダンスによって分圧される。

従って、建家間電位差は地絡電流が接地幹線に流入するときも、接地幹線の定数によって変ることが考えられる。図 12 は電源棟におけるトロイダル磁場コイル電源の接地抵抗を 7Ω 、垂直磁場コイル電源の接地抵抗を 0.3Ω として、接地線のインダクタンス、抵抗を変えたときの建家間電位差ならびに接地幹線を流れる地絡電流（最大値）を示す。但し、架台およびその他の定数は一定（表 2）とした。ここで、建家間電位差は実験棟内の接地幹線端 J_0 と電源の接地幹線端 D_{03} との間の電位差を指す。

接地幹線の抵抗が小さい場合（例えば、 $100\mu\Omega$ の場合）、接地幹線のインダクタンスが大きいほど建家間電位差は大きくなる。これは、図 11 からわかるように地絡時の垂直磁場コイル電源が電圧 10kV で運転されており、地絡電流の立上りが極めて急しゅんになるため接地幹線のインダクタンスが大きく影響している。また、接地幹線の抵抗が小さい場合は地絡電流自体も大きくなる。接地幹線の抵抗が大きい場合（例えば、 1.0Ω の場合）、接地幹線のインダクタンスの影響がなくなる。これは抵抗が大きいと地絡電流の立上りがゆるやかになり、接地幹線のインダクタンスの影響が小さくなるためである。

以上のことから、地絡事故の場合、接地幹線の定数の設定が重要になることがわかる。実際の場合、接地幹線は構造的に大きくなり、抵抗値も低くなることから低インダクタンスに設計することが必要になる。

例えば、2 重競合地絡事故の場合、建家間電位差を $1,000\text{V}$ 程度に低減するには、接地幹線のインダクタンスを $35\mu\text{H}$ 程度にしなければならない。

5. あとがき

JT-60 実験施設において落雷事故、磁場コイルの地絡事故などが発生した場合の諸現象を解析し、次のような結論を得た。

(1) 避雷針に落雷があつて雷電流が避雷電極に流入した場合、建家間電位差を低減するには避雷電極の接地抵抗を低くし、かつメッシュ線との漏えい抵抗を大きくすることが必要である。

(2) 同様の落雷事故において、接地幹線のインダクタンスは、建家間電位差を低減する主要な因子になる。接地幹線の抵抗は数 $10\mu\Omega$ と低くでき、インダクタンスも 1m 当り $0.6\sim 0.8\mu\text{H}$ で製作できるため建家間電位差は低くすることができた。

(3) 磁場コイルが地絡事故を起した場合、地絡電流は接地幹線を通るため建家間（実験棟～電源棟間）電位差を低減するには接地幹線のインダクタンスを低減する必要がある。すなわち、磁場コイルの地絡事故の場合発生する過電圧はほぼ架台と接地幹線とで分圧することになるので接地幹線のインダクタンスを小さくすることによって分担電圧（建家間電位差）を低くすることが可能である。

終りに、本研究に際し終始御指導を賜りました、日本原子力研究所大型トカマク開発部 吉川九二次長、同部 JT-60 第 2 開発室 田村早苗室長、日立製作所日立工場電力設計部 齊藤龍生主任技師に、感謝の意を表します。

（昭和 56 年 5 月 28 日受付，同 56 年 12 月 7 日再受付）

文 献

- (1) IEEE: "Guide for Safety in Alternating-Current Substation Grounding" (1971)
- (2) 久住・内藤・麻生: 「メッシュ接地電極のサージ応答」 東北大学通信談話会記録 44, 3, 176 (昭 50-8)
- (3) 麻生・久住: 「発電所雷撃時のシールド系電位分布」 東北大学通信談話会記録 45, 4, 192 (昭 51-11)
- (4) 三上・五十嵐: 「EHV 新潟変電所での接地系衝撃特性ならびに低圧制御回路の誘起電圧試験結果 (1)」 電気評論 605 (昭 43-4)
- (5) 三上・五十嵐: 「EHV 新潟変電所での接地系衝撃特性ならびに低圧回路の誘導電圧試験結果 (2)」 電気評論 742 (昭 43-5)
- (6) 田中: 「網状接地電極の接地抵抗の近似計算法について」 電学誌 73, 733 (昭 28-7)
- (7) S.J. Schwartz: *Electrical World* (1955)
- (8) H.B. Dwight: *Electrical Engineering* (1936, Dec)
- (9) K. Arakawa, et al.: "Fault Current Analysis in JT-60 Grounding System", 8th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research, 15-09 (1979, Nov)